

用激光全息法研究 I 型裂纹 尖端附近横向应变

姜铃珍 刘海疆 李成江 邹立勋 耿完桢

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨, 150001)

摘要: 本文根据全息干涉计量学和断裂力学的基本理论, 研究裂纹尖端附近的横向应变, 给出了全息干涉法研究裂纹尖端附近横向应变曲线并与力学理论得到的曲线进行比较, 有较好的近似。

关键词: 应变 裂纹 激光全息干涉计量

Study of transverse strain near tip of crack type I using holographic interferometry

*Jiang Lingzhen, Liu Haijiang, Li Chengjiang
Zou Lixun, Geng Wanzhen*

(Dept. of Applied Physics, Harbin Institute of Technology)

Abstract: On the basis of the theory of holographic interferometry and fracture mechanics, the transverse strain at the tip of crack type I is studied. With the holograph of the strain field of crack tip, the strain curves are quantitatively analyzed, and the results are basically in agreement with the data obtained by fracture mechanics.

Key words: strain crack holographic interferometry

引 言

微裂纹的发展和演化对新型材料的发展有重要意义, 新型材料的设计、可靠性分析、性能预报都是建立在检测的基础之上, 所以寻求对微裂纹的检测具有实践意义。本文试图用全息干涉法检测横向应变, 为此首先研究 I 型裂纹在载荷情况下裂纹尖端附近的横向应变。

二、原 理

用有机玻璃作一试件, 如图 1 所示, 长 a , 宽 b , 厚为 t (mm), 制作 I 型裂纹其长为 a_0 , 在 y

方向加均匀载荷 p , 试件有形变如图 2 所示。

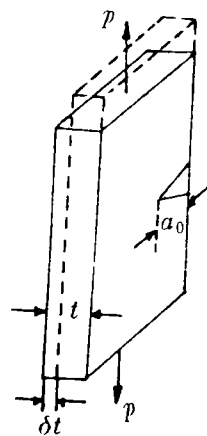
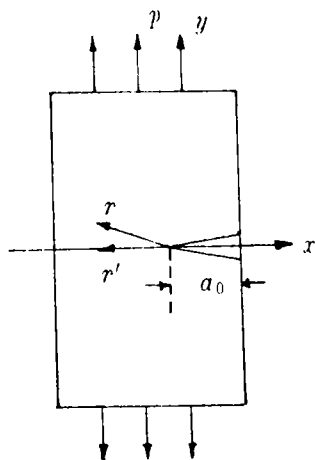


Fig. 1 Test specimen and coordinate system

Fig. 2 Loaded test specimen and its deformation

从 Maxwell-Neumann 应力光学定律出发^[1]

$$n_1 - n_0 = A\sigma_1 + B\sigma_2 \tag{1}$$

$$n_2 - n_0 = B\sigma_1 + A\sigma_2 \tag{2}$$

式中, n_0 为试件未受载荷时的折射率, n_1, n_2 分别表示在载荷下 x, y 轴方向上的折射率, σ_1, σ_2 分别表示试件在 x, y 方向上的应力, A, B 为光学常数。

又根据弹性材料应变与应力之间关系式^[2]

$$\epsilon_z = -\frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \tag{3}$$

式中, ϵ_z 为横向应变, μ 为试件泊松比, E 为试件的弹性模量。对试件加载前后的光程变化为 $\Delta\delta$

$$\Delta\delta = N\lambda = n(t + \delta t) - n_0t - \delta t \tag{4}$$

式中, N 为移动的条纹数, λ 为光波长, δt 为加载后形变量。由横向应变定义可知:

$$\epsilon_z = \frac{\delta t}{t}$$

由于试件材料可看作是低光学灵敏度材料^[3], 有 $A \approx B, n_1 \approx n_2 \approx n$ ^[4], 又考虑到等和材料条纹值定义^[5]得出横向应变 ϵ_z 与加载后条纹移动数 N 之间的关系式。

$$\epsilon_z = \frac{N\lambda}{t \left(n_0 - \frac{\lambda E}{f_p \mu} - 1 \right)} \tag{5}$$

式中, f_p 是等和材料的条纹值。

(5)式中 $t, n_0, E, \lambda, \mu, f_p$ 均已知, 当加载后只要测出条纹移动数 N , 则横向应变 ϵ_z 可算出。

三、实验光路

如图 3 所示, 光从 He-Ne 激光器 L 输出经快门 S, 全反镜 M_1 , 再经分束器 BS 分光, 一束经针孔滤波器 l_1 照射在全息干版 H 上作为参考光, 另一束经全反镜 M_2 , 扩束镜 l_2 照射在试件

O 上,其透射光落在全息干版 H 上,与参考光干涉,曝光时间 4s,显、定影后再复位,进行实时观察。将试件加纵向载荷 p ,不同样品载荷不同(参看实验结果),实时观察,C 为观察相机,试件的泊松比 $\mu = 0.35$, $E = 0.29 \times 10^3 \text{kg/mm}^2$,等和线材料条纹值每级 $f_p = 4.46 \text{kg/cm}$ 。

四、实验结果与理论值比较

1. 实验作了不同的四个试件,为简化问题只考虑裂纹尖端附近对称轴上的横向应变,如图 1 所示加载后拍出干涉图。数出条纹移动数,根据公式(5)算出 ϵ_z ,令 $\frac{\epsilon_z}{\epsilon_\infty} = y$,式中, $\epsilon_\infty = -\frac{\mu}{E}\sigma$ 。在对称轴 r' 上分别取 $r' = 2, 3, 4, 5, 6$

(mm)。令 $\frac{r'}{a_0} = x$,画出 x, y 的实验曲线。

2. 理论计算。据 I 型裂纹附近应力强度公式有

$$\sigma_1 = \frac{k_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{k_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (7)$$

因为 $\theta = 0$,即 r 与 r' 重合,将(6)式、(7)式代入(3)式得出

$$\epsilon_z = -\frac{\sqrt{2} \mu k_1}{E \sqrt{\pi r}} \quad (8)$$

式中, k_1 是强度因子,对单边缺口板查表为^[6] $k_1 = \sigma \sqrt{\pi a} \left[1.12 - 0.231 \left(\frac{a_0}{b} \right) + 10.55 \left(\frac{a_0}{b} \right)^2 - 21.72 \left(\frac{a_0}{b} \right)^3 + 30.95 \left(\frac{a_0}{b} \right)^4 \right]$,式中, $\sigma = \frac{p}{bt}$ 。

据(8)式算出理论值 ϵ_z 与 ϵ_∞ 比为 $\epsilon_z/\epsilon_\infty = x$,为理论 x 值,画出实验曲线与理论曲线。

3. 实例。样品一,厚 $t = 3 \text{mm}$,宽 $b = 100 \text{mm}$,裂纹长 $a = 8 \text{mm}$,载荷 $p = 82 \text{kg}$ 力。加载前后的实验照片如图 4 所示,实验曲线和理论曲线如图 5 所示。

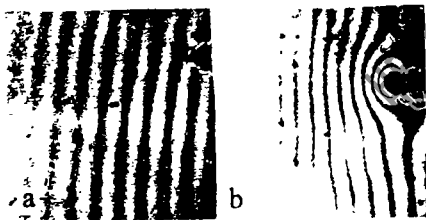


Fig. 4 Photograph of specimen 1
a—before loaded b—after loaded

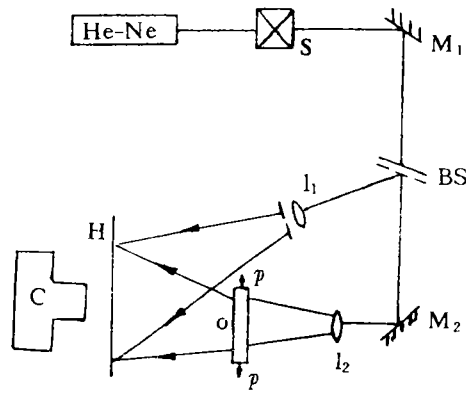


Fig. 3 Schematic drawing of optical arrangement

《激光技术》编辑部 版权所有

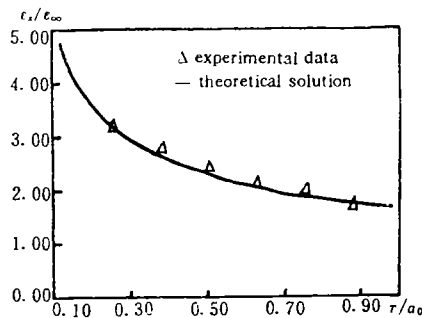


Fig. 5 Comparison of experimental curve with theoretical curve for specimen 1

样品二, $t=3\text{mm}$, $b=100$, $a=12\text{mm}$, $p=82\text{kg}$ 力。加载前后的实验照片如图6所示, 实验曲线和理论曲线如图7所示。

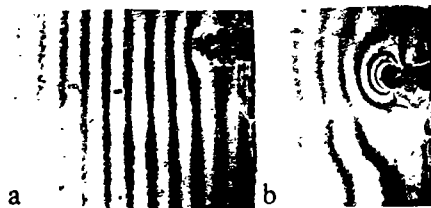


Fig. 6 Photograph of specimen 2
a—before loaded b—after loaded

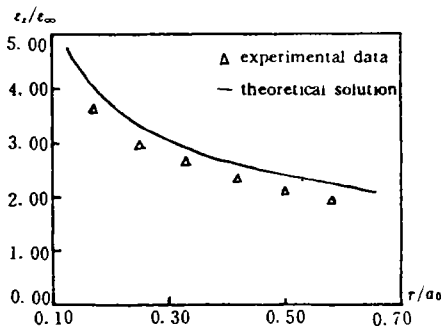


Fig. 7 Comparison of experimental curve with theoretical curve for specimen 2

五、分 析

1. 从上述实验看出, 当加载时裂纹尖端有特异条纹, 说明有形变存在, 裂纹有可能再发展出微裂纹。

2. 从前边的曲线可以看出, 实验测试结果与理论分析基本相符, 说明全息干涉法检测横向应变具有良好实用价值。

3. 从实验照片看出, 加载后的裂纹尖端有一黑点, 近似为椭圆形形状, 这正说明裂纹尖端存在着一定大小的塑性区。

4. 误差产生的原因, 主要是在实验过程中数条纹产生的误差。

参 考 文 献

- 1 Nisida M, Saito N. A new interferometric method of two-dimension stress analysis. *Exp Meth*, 1964; (4): 366~367
- 2 徐艺纶主编. 弹性力学. 上册, 北京: 人民教育出版社, 1982: 21
- 3 大连工学院数理力学光测组编. 光弹性实验. 北京: 国防工业出版社, 1978: 209
- 4 柯斯克 A. 光弹性应力分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 89
- 5 张如一主编. 实验应力分析实验指导. 北京: 清华大学出版社, 1980: 342
- 6 Twalids H L, Wanhill R J H. 朱永昌译. 断裂力学. 北京: 航空航天大学出版社, 1980: 50

作者简介: 姜铃珍, 女, 1940年2月出生。副教授。现从事激光全息及其应用的研究。

收稿日期: 1993-04-28 收到修改稿日期: 1993-11-24